0254-6124/2015/35(4)-438–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Ma Xin, Chen Gang, Zhong Dingkun, Zhao Zhengyu. Analysis and results from ISR observations of lower ionosphere(in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(4): 438-444, doi:10.11728/cjss2015.04.438

非相干雷达探测低电离层的结果分析*

马 欣[1,2] 陈 罡[1,2] 钟鼎坤[1,2] 赵正予[1]

1(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 位于波多黎各的 Arecibo 非相干雷达可以获得低电离层电子和离子密度, 利用此非相干雷达数据对中纬度低电离层的运动特征进行研究. 得到了电子密度随时间和高度的变化情况, 结果显著呈现出周日变化特征, 并分析了电子密度随高度的变化规律. 进一步对数据进行频谱分析, 深入研究低电离层电子密度的周日变化效应. 得到电子密度的高度剖面, 发现从 F 层底部到 E 层有明显的等离子体沉降. 低电离层的层结构特征及电子密度变化表明, 在该区域还存在不同程度的等离子体扰动, 由此对低电离层的作用因素进行分析, 认为大气潮汐或声重波可能对低电离层产生扰动, 即低电离层与大气存在一定程度的耦合作用.

关键词 低电离层, 非相干雷达, 等离子体, 潮汐, 声重波

中图分类号 P 352

Analysis and Results from ISR Observations of Lower Ionosphere

MA Xin[1,2] CHEN Gang[1,2] ZHONG Dingkun[1,2] ZHAO Zhengyu[1]

1(*School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan* 430072)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The D and E regions lie in the lower ionosphere region of 60∼110 km height. This region is influenced by solar radiation, cosmic noise radiation, atmospheric electrodynamics and many factors, and there exists a variety of incredible variation characteristics. Even in the magnetically quiet day, atmospheric electrodynamics can make a significant effect on this region except solar radiation. In the D region, there exists radio waves strong absorption, which can influence the transmission of high frequency radio waves. Electron and ion density can be obtained from the Incoherent Scatter Radar (ISR) Arecibo, located at Puerto Rico. ISR data can be used to study the movement characteristics of the lower ionosphere in mid-latitude, and get the electron density curves changing with time and height, which present obvious diurnal changing phenomenon. The spectrum

* 国家自然科学基金项目 (41474132), 国家重点实验室专项基金项目和长江科学院开放研究基金项目共同资助 (CKWV2013224/KY)

2014-01-14 收到原稿, 2015-03-05 收到修定稿

E-mail: 907933623@qq.com

of the data is analyzed to probe diurnal effects of electron density changes. Besides the electron density height profiles have been drawn, and observe obvious plasma descending from the base of F-layer to E region. The layer structure characteristics of the lower ionosphere and electron density changing show that there exists different degree of disturbance. By analyzing the influencing factors it is concluded that the atmospheric tides and the acoustic gravity waves can cause disturbance to lower ionosphere, which is coupled with the atmosphere in certain degree.

Key words　Lower ionosphere, Incoherent Scatter Radar (ISR), Plasma, Tides, Acoustic gravity waves

0　引言

扰动电离层 D 层的辐射源包括 X 射线, 宇宙线, Lymanalpha 射线和远紫外辐射. 这个区域气密度较大, 电子密度较小. 由于较大的空气密度和较高的碰撞频率, 导致对穿越的无线电波强烈吸收, 影响高频无线电波传播, 严重时造成无线电通信中断. D 层的光化学过程极其复杂, 其又是地球表面与电离层之间传播的低频和甚低频无线电波反射区域, 电子密度的变化往往会造成低频及甚低频无线电波的相位和振幅发生相应变化, 从而影响低频及甚低频无线电导航与定位系统的精度. 以往有关 D 层电子浓度和碰撞频率随高度变化的信息主要是通过低频或甚低频无线电波传播实验得到的, 目前部分数据还可以由火箭探测载荷获得. 由于 D 层对无线电波的强吸收以及火箭探测高成本和非连续性, 至今 D 层的观测资料不如 E 层和 F 层的丰富.

由于高度较低, 电子和中性粒子以及离子的碰撞频率较高, 无线电波在这一层中的衰减严重. 对 D 层无线电波的吸收研究不仅对于无线电波的传播具有重要的实用价值, 而且还对磁暴、电离层暴及其相关空间现象的实验观测和理论研究具有重要意义. 由于对 D 层观测手段的局限性以及其中光化学过程的复杂性, 到目前为止在电离层各区域中, 对 D 层的认识最为薄弱 [1−2]. 按照光化学理论, 影响该区域光化学过程的因素大致可以分为两个方面. 一是 D 区的辐射源, 其随太阳天顶角及太阳活动强度而变化; 另一方面涉及到 D 层中性大气成分及其变化, 各种时间尺度的中性大气扰动使得 D 层的光化学过程愈加复杂.

电离层运动就是电离层中的大气环流、湍流、潮汐振荡和各种大气波动过程. 其不仅与磁层扰动以及太阳活动紧密相关, 同时与电离层高度以下的大气运动有紧密的动力耦合. 而来自下面的气象影响则包含若干种动力过程所致的上下层能量交换, 这些动力过程可包括行星尺度波、潮汐波、声重力波及次声波等, Xiao 等 [3] 认为 D 层无线电波吸收行为的变化与对流层行星尺度波的激发具有密切关系. 而本文提出的低电离层夜间周期性变化可能与大气潮汐作用有一定关系, 声重波可能也会影响低电离层. 大气潮汐是大气层在重力、热力等作用下产生的一种大尺度扰动 [4]. 这种潮汐运动的激励源可能是该高度上氧分子对太阳辐射的吸收. 大气潮汐对电离层形态具有重要影响, 研究表明电离层 E 层高度的大气潮汐是大气发电机的驱动力, 其存在主要是由地面地磁场变化观测资料间接证实的.

Mathews 等 [5−6] 得到的结论是大气潮汐对低电离层在两个高度范围处具有显著影响. 一是约 90 km 高度, 受周日潮汐作用影响; 二是 100∼110 km 高度区域, 受周日和半周日潮的控制. 本文结果由非相干散射雷达的研究数据得出, 在电离层 80∼100 km 高度处电子密度有周期的变化特征, 推断得出这一高度可能受太阳周日潮汐作用的影响. 而在 100∼110 km 高度处可能受周日和半周日潮汐作用的共同影响.

1　电离层观测与现象分析

1.1　电子密度的变化

Arecibo 非相干散射雷达 (ISR) 观测用于研究薄等离子层并在高分辨率条件下推断其电动力学过程, 这项研究最初是用来检验电离层的异常现象偶发 Es 层 [7−8]. Arecibo ISR 观测显示在 80∼200 km 高度处离子层持续存在, 在夜间 80∼100 km 会出现明显的周期现象, 推断其可能与潮汐作用有关. 低电离

层 80～110 km 高度的层结构形成过程可能由于风剪切机制引起 [9].

图 1 给出了低电离层 80～90 km 高度电子密度连续 4 天的周日变化. 从图 1 可以看出, 在这一高度处电子密度表现出很明显的周日变化特征, 中午达到最高, 夜间变低. 在 80 km 高度处中午的电子密度值达到了 $10^3\,\mathrm{cm}^{-3}$, 而在 85 km 和 90 km 高度, 正午电子密度增大, 可见随着高度增高, 中午由于太阳辐射, 低电离层电子密度逐渐增高. 在夜间电子密度并没有完全降到零, 可以看出电子密度有微弱的脉冲突起, 存在周期性的变化. 对图 1 所示的电子密度进行平滑处理, 即可得到如图 2 所示的平滑曲线. 从图 2 可以清晰看到电子密度呈现出周日变化及在夜间电子密度呈现的周日变化特征, 电子密度在夜间有很明

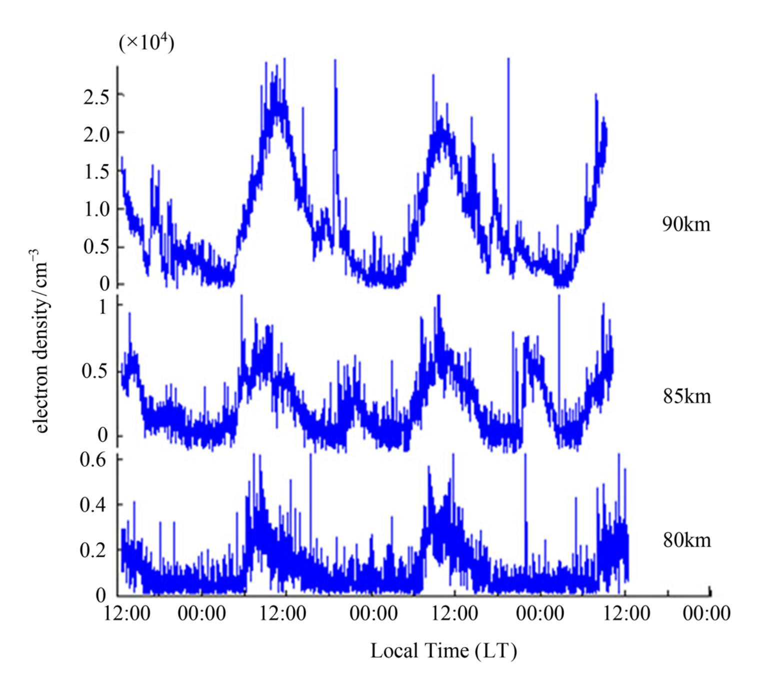


图 1 80～90 km 高度电子密度随时间的变化曲线

Fig. 1 Electron density variation with time at 80～90 km altitude

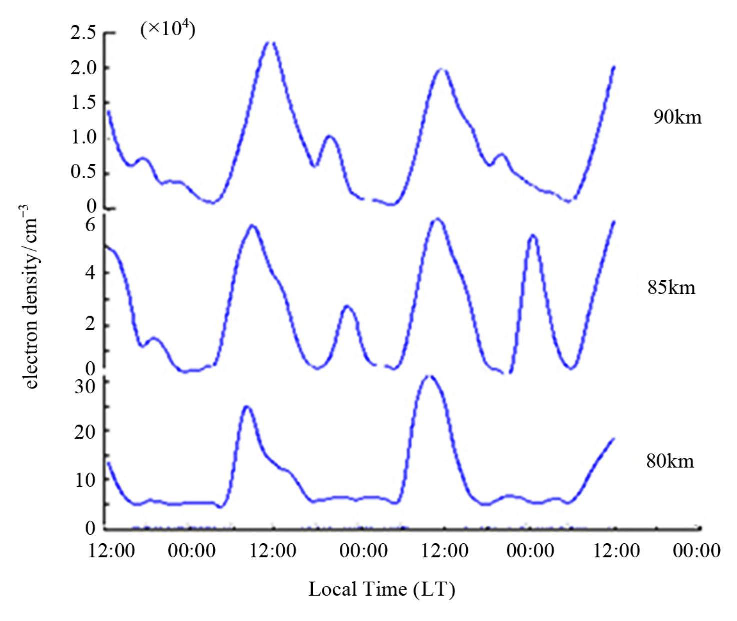


图 2 80～90 km 高度电子密度滑处理后随时间的变化曲线

Fig. 2 Electron density variation with time after smooth processing at 80～90 km altitude

显的周期性变化, 表现出正弦突起. 由于低电离层的电子密度变化除受太阳照射、高能粒子沉降、宇宙噪声辐射的影响外, 还与大气动力学有关. Mathews 等 [2] 指出, 电子密度 N_e 的系统误差为 50~180 cm^{-3}, 而夜间的电子密度突起达到 10^3 cm^{-3} 数量级, 系统噪声对夜间电子密度的变化影响很小, 所以可排除系统噪声的影响. 根据低电离层与大气耦合作用, 推断出夜间电子密度的周期性变化可能是由于大气周期潮汐作用的影响, 而出现的微小波动则可能是声重波作用造成的 [10].

图 3 给出的是电子密度在 100~110 km 区域的变化曲线, 这一区域同样也呈现出周日变化特征, 正午电子密度值达到 10^4 cm^{-3}, 夜间电子密度降低. 从图 3 可以看出, 在夜间电子密度并没完全降到零, 时而出现尖峰突起. 这一区域是电离层异常现象偶发 Es 层存在的区域, 以往研究认为, 这一区域在中纬度是通过风剪切电动力学机制形成的. 图 3 表明夜间电子密度会出现尖峰脉冲, 这种现象与偶发 Es 层的产生具有相关性 [11], 这一区域的层结构形成过程可能是由风剪切机制引起的.

1.2　电子密度的高度剖面

图 4 给出了中午电离层 D 层电子密度变化的高度剖面. 利用 1999 年 10 月 12 日中午的 ISR 电子密度数据, 得到如图 4 所示的电子密度变化 $N_e(h)$ 剖面, 从而对电子密度随高度的变化情况进行分析. 从图 4 可以看出, D 层电子密度随高度增高而逐渐增大, 到约 68 km 高度处达到最大, 之后再减小, 到约 85 km 高度处电子密度又增大. D 层电子密度表现出先增大后减小的趋势, 与长波观测和交叉调制技术得到的结果类似, 都是在 60~70 km 之间达到最大, 有一峰值. 电子密度 N_e 的系统误差约为 10^2 cm^{-3}, 与峰值相比可以忽略, 因此可以得出电子密度高度剖面的有效性. 中午太阳天顶角最高, 由于太阳辐射而电离的电子密度值很高, 达到了 10^3 cm^{-3}. 本文利用非相干雷达探测到的高度剖面与长波观测和交叉调制技术得到的电子浓度剖面相似, 因此认为非相干雷达是观测 D 区的有效探测手段.

1.3　电离层 D 层低高度处的频谱分析

通过对低电离层的电子密度进行频谱分析, 取采样频率 f_s = 100 Hz, 数据点数 N = 256, 给出了 60~75 km 高度范围内每隔 5 km 电子密度变化的幅频特性曲线. 图 5 所示为连续 4 天 3115 个数据的频谱分析结果, 可以看出电子密度的周期频率变化, 显示出的波动大约为 0.1 s 周期. 由此可以分析电子密度浮动的变化规律性.

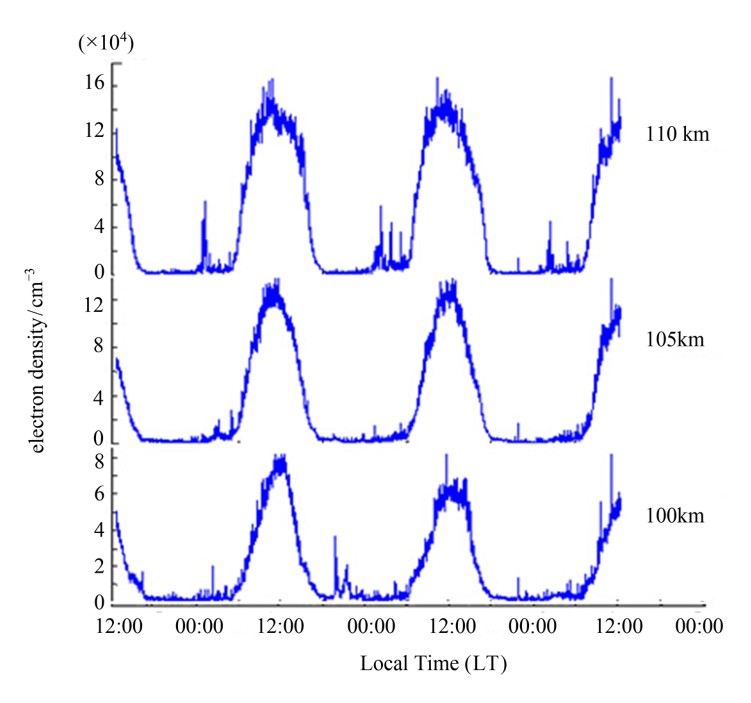


图 3　100~110 km 高度电子密度随时间的变化曲线

Fig. 3　Electron density variation with time at 100~110 km altitude

2 数据处理

为更好地反映电离层电子密度的周日变化, 本文利用 Arecibo 雷达 1994 年 1 月 11−14 日时期的电子密度数据 (这一时段没有发生明显的耀斑爆发和磁暴事件), 研究磁静日状态下低电离层的变化规律.

选取 Arecibo 雷达 E-F 层段的电子密度数据, 其是利用巴克码方法在这一区域获得的高分辨率数据, 覆盖范围 60~550 km, 得到的电子密度分辨率为 0.6 km, 得到的系统误差约为 $10^2\,cm^{-3}$. 截取其中 60~200 km 高度的电子密度数据, 对低电离层的电子密度随时间和高度的变化情况进行研究. 对 1994 年 1 月 11 日的数据进行分析, 其为 640×3115 阶矩阵, 具有高度的分辨率 (0.6 km). 由于 D 层的电子密度很低, 60~80 km 高度间的电子密度很微弱, 周日变化情况不很明显, 因此分析低电离层 80~110 km 高度的电子密度变化情况. 在对低电离层电子密度的三维图进行分析时, 截取了 60~200 km 高度的电子密度数据, 电子密度集中剖面如图 6 所示.

Arecibo 雷达用于观测电离层垂直电子密度剖面, 本文研究了 60~120 km 高度的电子密度变化情况, 得到高分辨率的电子密度剖面 (见图 7). 图 7 中显示了低电离层的结构特征和清晰的波状结构, 揭示了联系 D 与 E 层的电动力过程. 潮汐作用的区域和偶发 Es 层在 100~110 km 高度处经常出现尖峰脉冲和齿状结构. 而且有一些波状的结构, 垂直波长超过 30 km 高度, 电子流被观测到从 F 层底部延伸到中间潮汐影响的区域, 耦合到低层的 90~110 km 处.

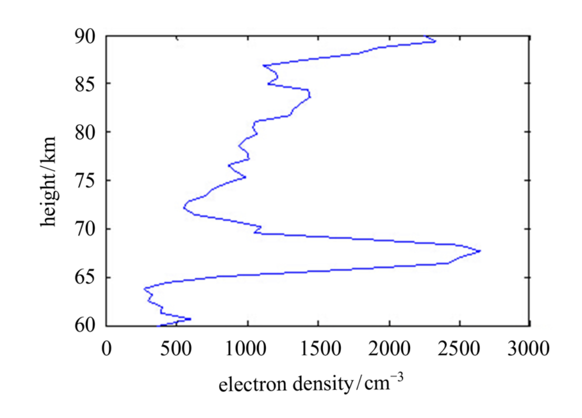


图 4 电子密度变化的高度剖面

Fig. 4 Height profiles of electron density change

3 电子密度剖面观测与分析

图 6 给出了 60~200 km 高度电子密度的集中剖面, 可以看到有明显的 F 层电子流沉降, 从 F 层 200 km 高度处开始向下延伸的离子流一直沉降到 E 层底部约 100 km 高度处. 图 7 给出了 60~120 km 高度电子密度集中剖面, 可以看出在 80 km 高度处电子密度才明显存在, 再向下的高度处电子密度呈现出零散分布. 由非相干雷达观测得出, 在低电离层区域离子层持续存在于 80 km 以上 [12].

图 6 和图 7 给出的是连续 4 天的电子密度剖面, 从图中可以看出电子密度呈现明显的周日变化特征,

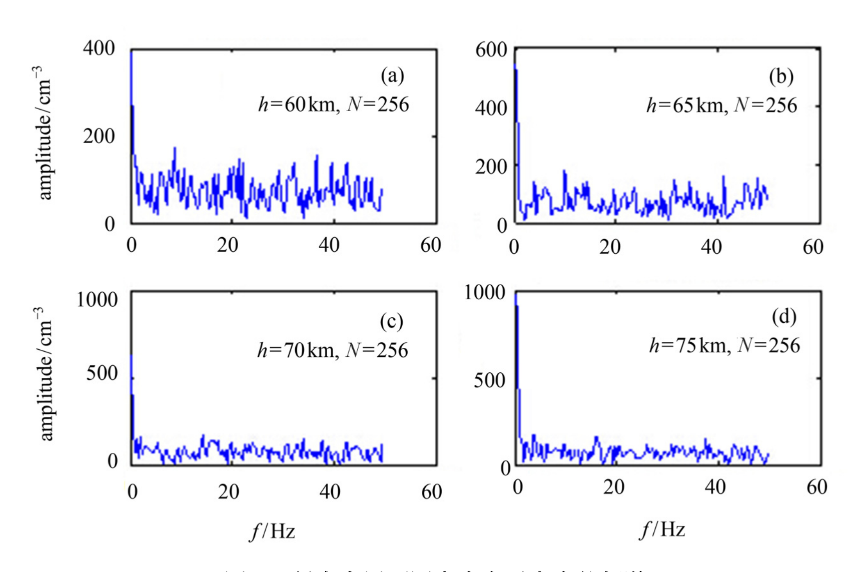


图 5 低电离层不同高度电子密度的频谱

Fig. 5 Spectrum of the electron density for each height in the lower ionosphere

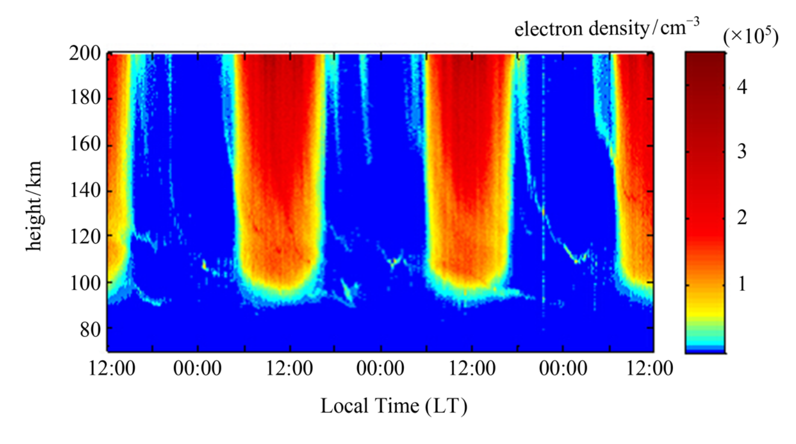


图 6 60~200 km 高度电子密度剖面

Fig. 6 Electron density concentration profiles at 60~200 km altitude

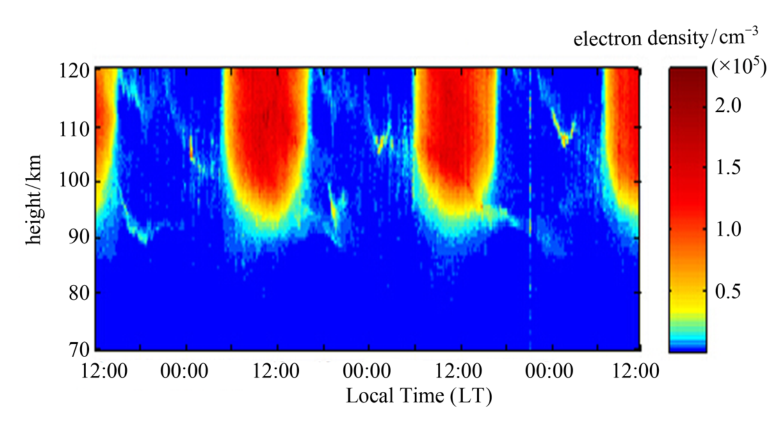


图 7 60~120 km 高度电子密度剖面

Fig. 7 Electron density concentration profiles at 60~120 km altitude

夜间电子密度出现沉降与连续波动的周期性变化特征. 根据电离层与大气的耦合理论, 低电离层受下层大气的气象控制 [13], 能量从低层大气通过重力波、潮汐和行星波等流体运动作用垂直向上输送到上层是完全可能的. 夜间呈现周期性波动效应, 由 Mathews 等 [9] 的研究可以得出, 低电离层由大气周日潮汐作用控制, 而 100~110 km 区域受周日和半周日潮作用的影响. 图 6 和图 7 表明, 在 80~100 km 高度处电子密度呈现周日变化特征, 推论其可能是周日潮汐作用影响所致; 而在 100~110 km 高度电子密度可能受周日和半周日潮的控制. 另外可以看到在 200 km 高度处 F 层底部出现与半日潮相联系的中间波状层结构. 本文所得结论与文献 [5] 中得到的结论相符.

图 8 给出了电子密度的夜间变化趋势, 可以看出电子密度出现波状的震荡现象. 在大约 90 km 和 100 km 两个高度处, 电离层出现连续的波状结构. 在 80~100 km 低高度层受到大气周日潮汐的影响, 而在 100~110 km 高度区域由周日和半周日潮控制, 由图 6 可以看到在 200 km 高度处 F 层底部出现与半日潮相联系的波状结构.

从图 6 到图 8 中的现象可以推断出, 低电离层不仅可能受到大气潮汐作用的影响, 而且还可能受到大气声重波向上传播的影响. Zhao 等 [14] 由昆明 MF 雷达探测的研究结果得出, 周日潮汐是 80~100 km 高度大气风场的主要扰动成分, 半日潮次之, 其振幅随高度改变, 相位向下传播. 从 90 km 高度处纬向风场和经向风场的振幅谱可以得出, 无论是经向风场还是纬向风场, 周日潮汐均是最强的分量. 通过谐波拟合方法得到周日潮汐的振幅和相位, 发现经向风场和纬向风场振幅随高度改变而改变, 相位随高度增加而增加, 向下传播.

4 结论与讨论

利用 Arecibo 非相干雷达探测低电离层的电离变化特征数据, 得到了 Arecibo 上空电离层 D 层和 E

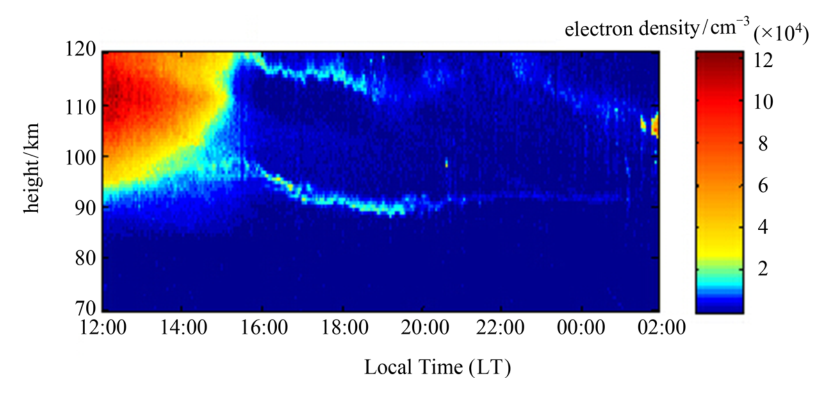


图 8 60∼120 km 高度电子密度夜间变化剖面

Fig. 8 Electron density concentration profiles in 60∼120 km height at night

层底部的电子密度剖面及电子密度的连续时间变化, 结果表现出 D 层电子密度随高度迅速增加, 电子密度白天高、夜间几乎消失的日变化特征; 有时会出现夜间电子密度周期性变化, 经过分析与比较后认为, 这种情况是由大气潮汐作用影响产生的, 通过分析可以进一步深入研究潮汐影响产生的详细周期变化现象; 80∼100 km 高度的电离层主要受大气周日潮汐的影响, 而在 100∼110 km 高度区域则受到周日和半周日潮的控制作用, 在 200 km 高度处 F 层底部出现与半日潮相联系的中间潮汐作用层.

利用非相干雷达可以探测到电离层底部尤其是 D 区的电子密度及其变化, 可以得到比较完好的 D 区电子密度高度剖面及其随时间的变化情况. 因此认为非相干雷达是研究 D 层的有效探测手段.

研究结果表明, 低电离层除太阳耀斑活动时期在带电粒子沉降作用下有明显扰动外, 在静日条件下大气周期性潮汐作用可能对低电离层有显著影响, 同时声重波也可能对低电离层有微扰的影响. 另外, 电子密度具有很好的周日变化特征, 周期性明显; 夜间电子密度在一定高度处会有正弦和尖峰的突起, 从而可以进一步分析夜间低电离层的变化效应和引发机制.

参考文献

[1] Danilov A D. New ideas on the D-region modeling [J]. *Adv. Space.Res.*, 2000, **25**:5-14

[2] Mathews J D, Breakall J K, Ganguly S. The measurement of diurnal variations of electron concentration in the 60∼100 km ionosphere at Arecibo [J]. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1982, **44**:441-448

[3] Xiao Zuo, Zhang Shuli. The ionospheric absorption in winter and summer asymmetry at mid-latitude and the possibility of the lower atmosphere coupling [J]. *J. Geophys.*, 1984, **1**:27-34

[4] Fujitaka K, Tohmatsu T. A tidal theory of the ionospheric intermediate layer [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1973, **35**:425-438

[5] Mathew J D, Sulzer M P, Perillat P. Aspects of layer electrodynamics inferred from high-resolution ISR observations of the 80∼270 km ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(11):1411-1414

[6] Mathews J D. Incoherent scatter radar probing of the 60∼100 km atmosphere and ionosphere [J]. *IEEE Trans. Geosci.*, 1986, **24**:765-776

[7] Christakis N, Haldoupis C. Seasonal variability and descent of mid-latitude sporadic E layers at Arecibo [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**:923-931

[8] Mathews J D. Sporadic E. Current views and recent progress [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997

[9] Mathews J D, Bekeny F S. Upper atmosphere tides and the vertical motion of ionospheric sporadic layers at Arecibo [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**:2743-2750

[10] Miller C A. On Gravity Waves and the Electrodynamics of the Mid-latitude Ionosphere [D]. Ithaca N Y: Cornell University, 1996

[11] Christakis N, Haldoupis C. Seasonal variability and descent of mid-latitude sporadic E layers at Arecibo [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**:923-931

[12] Zhou Q, Mathews J D. A spectral technique or the detection and correction of coherent interference effects on incoherent scatter power profiles [J]. *Radio Sci.*, 1994, **29**:1173-1177

[13] Gregory J B, Manson A H. Seasonal variations of electron densities below 100 km at mid-1atitudes in differential absorption measurements [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1969, **31**:683-701

[14] Zhao Lei, Chen Jinsong. Kunming MF radar and its preliminary detection results [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **1**:27-33. In Chinese (赵蕾, 陈金松. 昆明 MF 雷达及初步探测结果 [J]. 空间科学学报, 2011, **1**:27-33)